

О. А. СІРИЙ, М. З. АБДУЛІН

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СТРУМЕНЕВО-НИШЕВОЇ СИСТЕМИ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА

В роботі представлено результати експериментальних досліджень температурного стану факелу та продуктів згоряння зрідженого газу в струменево-нишевій системі спалювання та стабілізації палива. В результаті вимірювань отримані закономірності температурного поля факелу, його конфігурації в залежності від основних геометричних параметрів паливорозподілу. Установлені ефекти впливу відносно величини діаметру та кроку розташування паливних отворів і відстані від зривної кромки стабілізатора на організацію механізму горіння палива.

Ключові слова: струменево-нишева система, параметри паливорозподілу, довжина факелу, дифузійно-кінетичне горіння.

A. A. СЕРЫЙ, М. З. АБДУЛИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУЙНО-НИШЕВОЙ СИСТЕМЫ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

В работе представлены результаты экспериментальных исследований температурного состояния факела и продуктов сгорания сжиженного газа в струйно-нишевой системе сжигания и стабилизации факела. В результате измерений получены закономерности температурного поля факела, его изменения в зависимости от основных геометрических параметров топливораспределения. Установлены эффекты влияния величины диаметра и относительного шага расположения топливных отверстий, а также расстояния от срывной кромки стабилизатора на организацию механизма горения топлива в системе.

Ключевые слова: струйно-нишевая система, параметры топливоподачи, длина факела, диффузионно-кинетическое горение.

A. SIRYI, M. ABDULIN

ANALYZING POWER INDICES FOR THE JET-NICHE FUEL COMBUSTION SYSTEM

This scientific paper is devoted to the studies of a temperature state of the torch for the propane-butane mixture firing in conditions of the jet-niche combustion system and the flame stabilization. The investigation was carried out to define the torch length and the configuration of it and detect the effects of the influence of fuel distribution parameters (fuel port diameters, the arrangement pitch and the distance from the stall edge of stabilizer L_1) on the torch length (range) for the combustion of liquefied and natural gases. It was established that the temperature distribution corresponds to general ideas of the influence of combustion mechanism that is realized in certain cases. Combustion of a high-calorific propane-butane mixture requires the adjustment of fuel distribution system through an increase in the relative pitch and the distance L_1 in comparison with the geometry adopted for natural gas. The obtained data showed that a maximum homogenization of the fuel mixture can be achieved through the selection of appropriate parameters. A rise of the temperature in the core flame by 85 to 120 °C and a decrease in the visible length of it by 20...50 % are indicative of this fact. Homogenization also results in a certain shortening of the range of smooth fuel burning in terms of excess air coefficient. In this case the combustion mechanism is shifting to the kinetic domain. In the case of use of the fuel supply geometry that is intended for less calorific gasses the pure diffusion fuel combustion is realized for the liquefied gas combustion. This combustion mechanism is characterized by a considerable persistence of the combustion front and an increased amount of underfired (unburnt) fuel, though it manifests the highest flame smoothness in terms of excess air coefficient. Investigation of the torch geometry and the temperatures allowed us to obtain the following parameters of fuel distribution for the liquefied gas combustion $d = 2...6$ mm, $\bar{S} = 3.8...6.5$, $L_1 = 10...25$ mm. The recommended parameters enable the realization of combustion mechanism that is shifted to the kinetic domain. Practical dependences of the torch length on studied fuel supply parameters were obtained.

Key words: jet-niche system (JNS), fuel supply, torch length and the diffusion-&-kinetic combustion.

Вступ

Однією з основних особливостей топкових технологій є використання різноманітних елементів стабілізації та інтенсифікації горіння [1–3], серед яких особливе місце займає струменево-нишева система стабілізації та спалювання газу (СНС) [4]. Експериментальні дослідження показали, що робочі характеристики СНС сприяють реалізації наступних принципів перспективної універсальної технології спалювання:

- раціональний розподіл палива в потоці окисника;
- стійка регульована структура течії палива, окисника та продуктів згоряння;
- саморегульованість складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу.

За рахунок розміщення СНС на автономному колекторі-пілоні, з яких складається пальник, забезпечуються наступні принципи, що забезпечують надійність та ефективність експлуатації обладнання:

- самоохолодження пальника;
- термічна підготовка пального;
- модульність пальників [5].

На основі СНС базується універсальна система синтезу пальникових систем, що забезпечує технологічність їх виготовлення, можливість «тиражування» теплової потужності, а також прогнозування та мінімізації шкідливих викидів у продуктах спалювання вогнетехнічного обладнання (ВО) [6].

Розміщення одиничних пілонів у рівномірну решітку стабілізаторів в залежності від необхідної

тепловій потужності формує пальники, в основу робочого процесу яких покладено вище зазначені принципи СНС. Виконане таким чином промислове газопальникове обладнання реалізує струменево-нішеву технологію спалювання палива (СНТ), яка має ряд відомих переваг у порівнянні з традиційними технологіями спалювання, що в основному працюють із закруткою потоків палива та окисника [7].

Ціль роботи

Універсальність технології спалювання визначається можливістю ефективного використання газів для різного ВО з різними рівнями температур та надлишку повітря. Одним з можливих варіантів забезпечення вимог універсальності є визначення можливості адаптації пальників, які працюють на природному газі, спалювання зрідженого газу (суміш пропан-бутану) в якості резервного палива. Як показали експериментальні дослідження пускових та зривних режимів роботи системи, при раціональному виборі параметрів паливо розподілу вдається забезпечити надійне стає горіння обох газів без зривів, проскоків та пульсації факелу [8].

Основною метою представленого експериментального дослідження є визначення впливу геометричних параметрів паливоподачі СНС на розподіл температур у факелі при горінні газоподібних палив, що має слугувати основою при розробці практичних рекомендацій для проектування та впровадження у промисловість газопальникового обладнання на основі СНТ.

На рис. 1 наведена СНС та основні параметри паливо розподілу.

Важливим фактором при виборі параметрів паливо розподілу залишається організація мікродифузійного процесу спалювання, який дозволяє забезпечити надійне та ефективне використання палива ВО.

Методика досліджень

Вимірювання температур проведено у лабораторних умовах на спеціально обладнаному стенді (рис. 2), за допомогою термоелектричних перетворювачів (ТЕП) типу ПП. У комплекті з термопарами в якості вторинного приладу використовувався електронний автоматичний багатоканальний реєстратор РМТ 69.

Повітря на горіння подається в робочу ділянку вентилятором 1 з можливістю регулювання його витрати за рахунок зміни частоти обертання робочого колеса нагнітача частотним перетворювачем 5. Витрата вимірюється двома інтегруючими трубками Піто 4, що встановлені в повітряному каналі навхрест, сигнал від яких виводиться на лабораторні мікроманометри 6. Пальний газ подається до газового колектора 9, який розміщується

безпосередньо в робочій зоні стабілізатору 10, його конструкція дозволяє проводити швидку заміну робочих модулів. Витрата палива вимірюється звужуючим пристроєм, перепади тиску фіксуються чашковими мікроманометрами 10. Підпал горючої суміші виконується свічею запалювання 11. Продукти спалювання, а також пальна суміш, що не прореагувала виводиться у димову трубу лабораторії. Місце стабілізації факелу 10 обладнане оглядовим віконцем, виконаним з кварцю, яке призначене для дослідження процесів запалювання/згасання факелу в стабілізаторі. Для визначення температур пального та окисника додатково використані термоелектричні перетворювачі опору (ТСМ) 2, 8. Для забезпечення допустимих температур найбільш теплонапружених елементів стабілізатору, реалізовано його примусове повітряне охолодження.

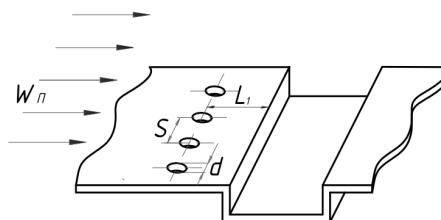


Рис. 1 – Струменево-нішева система, як елемент стабілізації факелу та інтенсифікації процесу горіння палива у газопальниковому обладнанні:
 W_n – швидкість потоку повітря в каналі паливника;
 L_1 – відстань паливних отворів від зривної кромки ніші; S – крок розташування отворів;
 d – діаметри отворів

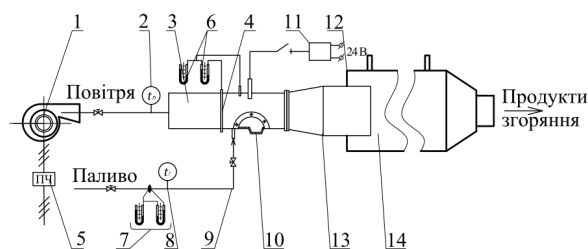


Рис. 2. – Схема лабораторного вогневого стенду:
 1 – вентилятор; 2 – термоелектричний перетворювач для вимірювання температури повітря; 3 – початкова ділянка; 4 – інтегральна трубка Піто; 5 – пристрій частотного регулювання обертів вентилятора; 6, 7 – блок манометрів; 8 – термоелектричний перетворювач для вимірювання температури палива; 9 – подача палива до основного колектора, розміщеного на струменево-нішевому модулі; 10 – струменево-нішевий модуль з оглядовим віконцем; 11 – свіча запалювання; 12 – штуцери для відбору проб та вимірювання температури газів по довжині факелу; 13 – дифузор; 14 – футерована вогнева ділянка

При дослідженнях температурних полів факелу системи та пальників використовувався ТЕП без захисного кожуху та камери гальмування, тому необхідно врахувати всі можливі похибки пов'язані з вимірюваннями температури у високошвидкісному потоці газу.

Похибка, яка пов'язана з тепловим випромінюванням від спаю термопар розраховується наступним чином:

$$\Delta T = \frac{\sigma \varepsilon_{\text{теп}}}{\alpha_{\text{теп}}} (T_{\text{теп}}^4 - T_c^4), \quad (1)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

$\varepsilon_{\text{теп}}$ – коефіцієнт чорноти спаю ТЕП;

$\alpha_{\text{теп}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від факела до спаю, Вт/(м²·К);

$T_{\text{теп}}$ – температура робочого спаю, К;

T_c – температура середовища в яке відбувається витікання суміші, К.

Оскільки вимірювання виконувались на режимах при неповному згорянні палива, що супроводжується покриттям королька ТЕП шаром сажі, то можна прийняти коефіцієнт чорноти спаю $\varepsilon_{\text{теп}} \approx 1$. Слід зазначити, що в умовах недопалу збільшується похибка вимірювань.

Коефіцієнт тепловіддачі при обтіканні потоком робочого спаю ТЕП, який виконаний у формі кульки з діаметром королька $d_k = 0,8$ мм може бути обчислений за формулами:

$$\alpha_{\text{теп}} = \frac{\lambda \text{Nu}}{d_k}, \quad \text{Nu} = 0,216 \text{Re}^{0,62}, \quad (2)$$

де число Рейнольдса обрховується $\text{Re} = Wd_k/\nu$, а всі параметри потоку відносяться до точки вимірювання і визначаються за таблицями [9].

Для випадку вимірювань температури продуктів згорання у факелі можна прийняти:

$$W = 25 \text{ м/с}, \quad T = 1600 \text{ К},$$

значення в'язкості та теплопровідності

$$\nu = 240,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \text{ та } \lambda = 13,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Підставляючи приведені значення, знайдемо:

$$\text{Re} = 100, \quad \alpha_{\text{теп}} = 630 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \text{ тоді } \Delta T = 80 \text{ К}.$$

Оскільки швидкості потоку дозвукові, а робочий спай термопарі віднесений від державки датчика на відстань 25 мм (що становить приблизно 55 діаметрів термоелектричних проводів), то похибками за рахунок не повного гальмування потоку та похибкою від втрат тепла через термоелектроди можна знехтувати [10].

Враховуючи похибку калібрування та похибку, пов'язану з підключенням термопар до схеми вимірювань, випадкова похибка склала 3 К. Рівень методичної похибки в сторону заниження температури складає 80 К. Таким чином, максимальне значення методичної похибки може складати 5 % від показів вторинних вимірювальних приладів і буде зменшено у випадку вимірювань параметрів потоку при нижчих значеннях швидкості та

температури. Так, наприклад, при швидкості потоку 10 м/с та температурі 1000 К, методична похибка складає 30 К, що становить 3 % від вимірюваної величини.

Обговорення результатів

При зміні конструктивних особливостей змінюється не тільки структура, але й далекобійність факелу. На рис. 3 представлено вплив кутового кроку розташування паливних отворів на конфігурацію та характеристики пропан-бутанового факелу при горінні у циліндричних стабілізаторах.

Збільшення відстані між отворами не тільки зменшує далекобійність, але й сприяє його максимальному відриву від устя пальника. Така картина характерна для кінетичного горіння, яке в даному випадку досягається за рахунок надмірної аерації кореня факелу і що, в свою чергу, спричиняє погіршення сталості горіння палива.

В ході досліджень виконувались вимірювання температури факелу та продуктів згорання в різних перетинах вогнетривкої футерованої ділянки, а саме: $x = 320, 630$ та 940 мм від газоподавальних отворів СНС. Вісь факелу співпадає з площиною нижньої стінки повітряного каналу на якій розміщена струменево-нішева система.

Результати вимірювань температури факелу при зміні діаметру паливних отворів приведено на рис. 4.

Видно, що розподіл температур на відстані від осі факелу має загальноприйнятний характер при горінні дифузійного факелу: максимальні значення знаходяться на осі і в найближчому до стабілізатору перерізі, зменшуються по мірі віддалення від нього. Також у віддалених перерізах графік залежності більш пологий за рахунок вирівнювання температур продуктів згорання. В цілому, криві розподілу температур симетричні відносно осі факелу і нижче за потоком схожі до характеристик горіння затоплених струменів. Слід зауважити, що для досліджуваного палива збільшення діаметрів отворів призводить до незначного збільшення температур ($20\text{--}65$ °С) у віддалених перерізах, а в перетині $x = 320$ мм – навпаки, очевидно, досягається це за рахунок збільшення дифузійності факелу, що призводить до «затягування» його довжини.

Вплив кроку розташування газоподавальних отворів наведено на рис. 5.

Так, приведені результати стосуються СНС з відносним кроком $\bar{S} = 2,3$ і $4,6$, і як видно, збільшення кроку в діапазоні наведених значень призводить до деякого збільшення рівня температур факелу в перших двох перетинах робочої ділянки. В перетині, що відповідає $x = 940$ мм, відбувається зворотна картина – температура продуктів згорання дещо зменшується.

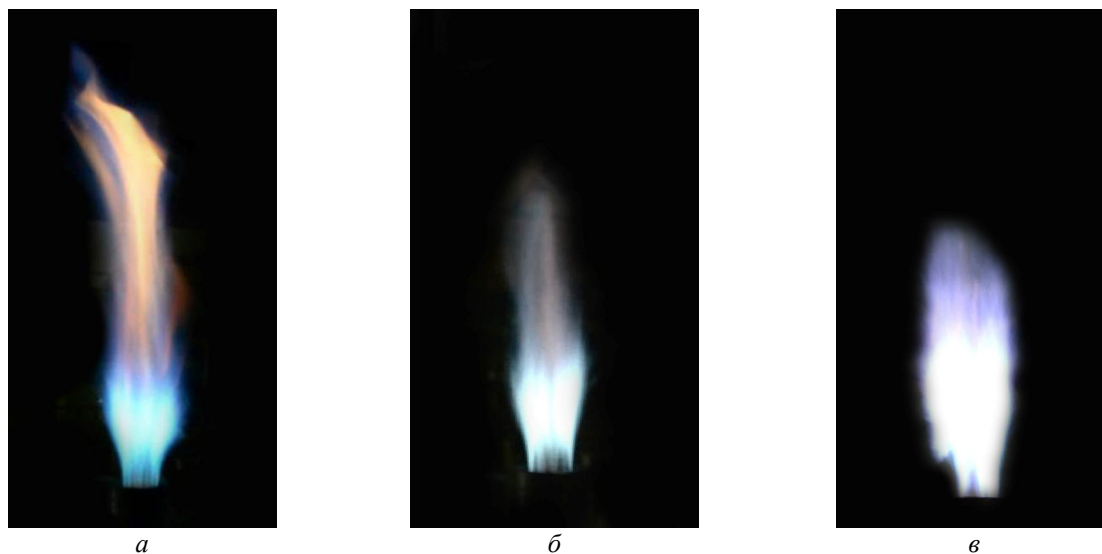


Рис. 3 – Структура відкритого факелу в циліндричній СНС для різних значень кутового кроку розташування паливних отворів φ : а – $22,5^\circ$; б – $36,0^\circ$; в – $45,0^\circ$; при $d = 2$ мм, $L_1 = 13,5$ мм

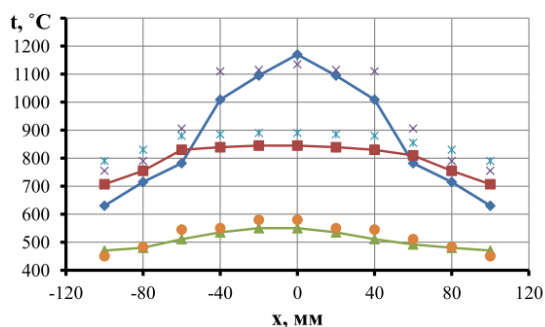


Рис. 4 – Вплив діаметру газорозподільчих отворів на розподіл температур в поперечному зрізі факелу при $W_n = 5$ м/с, $\alpha_\Sigma = 1,3$, $\bar{S} = 4,6$, $L_1 = 10$ в трьох перетинах вогнетривкої ділянки: 1, 4 – $x = 320$ мм; 2, 5 – $x = 630$ мм; 3, 6 – $x = 940$ мм, 1, 2, 3 – $d = 2$ мм та 4, 5, 6 – $d = 4$ мм

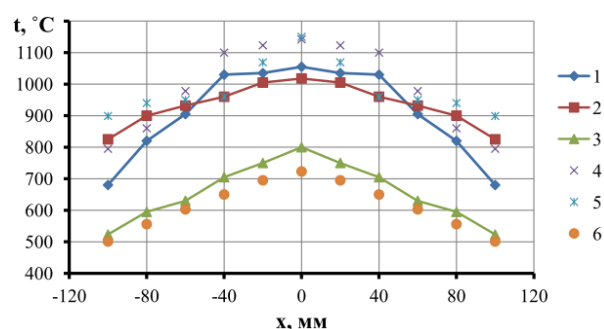


Рис. 5 – Вплив відносного кроку розташування газорозподільчих отворів на розподіл температур в поперечному зрізі факелу при $W_n = 5$ м/с, $\alpha_\Sigma = 1,1$, $d = 4$ мм, $L_1 = 11$; в трьох перетинах вогнетривкої ділянки: 1, 4 – $x = 320$ мм; 2, 5 – $x = 630$ мм; 3, 6 – $x = 940$ мм, для двох значень \bar{S} : 1, 2, 3 – $\bar{S} = 2,3$ та 4, 5, 6 – $\bar{S} = 4,6$

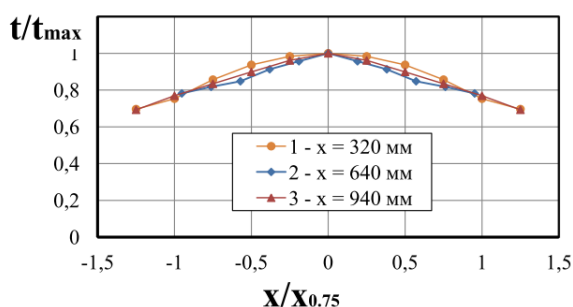


Рис. 6 – Розподіл температури в поперечному перерізі факелу в напрямі нормальному до розміщення СНС при $W_n = 5$ м/с, $\alpha_\Sigma = 1,1$, $d = 4$ мм, $\bar{S} = 4,6$, $L_1 = 10$ мм; в трьох перетинах вогнетривкої ділянки

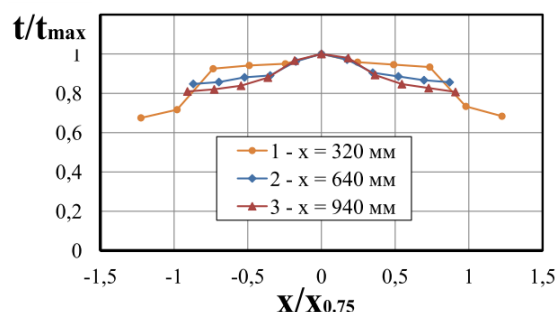


Рис. 7 – Розподіл температури в поперечному перерізі факелу в напрямі нормальному до розміщення СНС при $W_n = 5$ м/с, $\alpha_\Sigma = 1,1$, $d = 4$ мм, $\bar{S} = 4,6$, $L_1 = 25$ мм; в трьох перетинах вогнетривкої ділянки

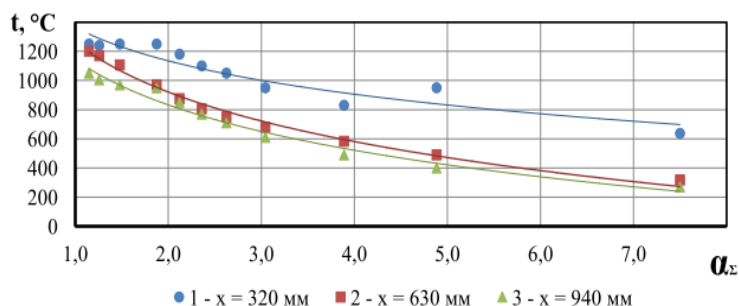


Рис. 8 – Зміна температури факелу вздовж осі при $W_n = 15$ м/с, $d = 4$ мм, $\bar{S} = 4,5$, $L_1 = 10$ мм в трьох перетинах вогнетривкої ділянки

Зазначені особливості вказують на перехід в бік кінетичного механізму горіння за рахунок зменшення часу дифузії пального та окисника при збільшенні кроку, що також, дещо зменшує довжину факелу і локально підвищує температуру горіння палива.

Результати дослідження впливу відстані газоподавальних отворів від передньої стінки ніші на розподіл температур в факелі в межах значень досліджуваного параметру мають незначний вплив, окрім останнього за потоком перетину, де на осі рівень температур для випадку $L_1 = 25$ мм на 35°C менший в порівнянні з геометрією $L_1 = 10$ мм. Очевидно, що при подальшому збільшенні відстані рівень температур в ближчих до стабілізатору перетинах буде збільшуватися, що призведе до зменшення довжини факелу і звуження меж сталої роботи СНС.

Дослідження впливу параметру відстані L_1 наведено у безрозмірних координатах (рис. 6). Температура представлена у вигляді відношень значень температури в точці t до максимального значення температури в досліджуваному перетині t_{\max} (на осі факелу). По осі абсцис відкладено безрозмірну координату, де в якості масштабу $x_{0,75}$ прийняте таке значення координати, при якому виконується рівність $t/t_{\max} = 0,75$.

Щодо порівняння температурного поля у відносних координатах, то у всіх трьох досліджуваних перетинах профіль повної температури є автомодельним, це видно з рис. 6.

З результатів видно, що зі збільшенням відстані від стабілізатору зменшується площа фронту полум'я, що в свою чергу призводить до скорочення довжини факелу. Наявні ознаки вказують на значний вплив відстані L_1 на механізм горіння факелу, таким чином зміщуючи від чисто дифузійної області в область кінетичного горіння палива (рис. 7).

Розподіл температур вздовж осі факелу в процесі виходу СНС на номінальні витрати палива приведено на рис. 8. Так, максимальні зафіксовані температури в досліджуваних умовах становлять $t_1 = 1250^\circ\text{C}$ при значенні коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 1,15$, а в тому ж перетині, мінімальні температури – $t_1 = 637^\circ\text{C}$ при $\alpha = 7,5$. В двох

подальших за потоком перетинах різниця рівнів температур незначна і зменшується при зменшенні витрати палива. Максимальна різниця між ними складає 150°C при мінімально зафіксованому значенні коефіцієнту надлишку повітря, що пояснюється заповненням факелом об'єму мірної ділянки футерованого каналу лабораторного стенду.

Отримані результати дозволяють оцінити можливості досліджуваної геометрії в плані організації механізму спалювання скрапленого газу. Так, навіть при відносному кроці $\bar{S} = 6,5$ вдалося досягти надійного запалювання та виходу на режим в межах $\alpha = 2,3$. Збільшення відстані призводить до гомогенізації паливної суміші в зоні стабілізації факелу, і тим самим, до зміни його конфігурації (скорочення факелу) і теплового режиму.

Для оцінки видимої довжини факелу в умовах СНС отримана залежність, яка враховує основні режимні та геометричні параметри:

$$\frac{L_{\text{ф}}}{d} = c \left(\frac{\rho_{\text{г}} W_{\text{г}}^2}{\rho_{\text{п}} W_{\text{п}}^2} \right)^m \alpha^n, \quad (3)$$

де c , m , n – константа та показники степеню при змінних в рівнянні,

$$\begin{aligned} \text{Природний газ: } & \begin{cases} c = 115, m = 0,17, n = -1,13, \\ d = 2 \dots 6 \text{ мм}, W_{\text{г}} = 6 \dots 70 \text{ м/с}, \\ W_{\text{п}} = 3 \dots 15 \text{ м/с}, \alpha = 1,1 \dots 3,0. \end{cases} \\ \text{Зріджений газ: } & \begin{cases} c = 133, m = 0,22, n = -1,26, \\ d = 2 \dots 6 \text{ мм}, W_{\text{г}} = 3 \dots 40 \text{ м/с}, \\ W_{\text{п}} = 3 \dots 15 \text{ м/с}, \alpha = 1,05 \dots 3,0. \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Висновки

1. В результаті проведених вимірювань встановлено, що розподіл температур відповідає загальним уявленням щодо фізичних характеристик факела залежно від реалізованого механізму спалювання. Зі збільшенням гомогенізації пальної суміші процес горіння зміщується в бік кінетичного, що досягається за рахунок відповідного вибору параметрів паливо розподілу. При цьому рівні температур в ядрі факела збільшуються в середньо-

му на 85...120 °С, а довжина видимої його ділянки зменшується на 20...45 %. Гомогенізація пальної суміші змушує діапазон регулювання горіння, особливо за рахунок звуження в зоні «збіднених» пальних сумішей (на 20...50 %). Максимальне виміряне значення температур у ядрі факела не перевищувало 1345 °С.

2. При реалізації мікродифузійного горіння палива вдається забезпечити помірну довжину факелу. У цьому випадку факел створює більше теплове навантаженням робочого об'єму, яке характеризується підвищеними температурами. Вказані особливості пояснюються основними гідродинамічними особливостями СНС, а також високою якістю сумішоутворення палива та окисника. Вищезазначене в якісному сенсі відрізняє пальники СНТ від інших технологій.

3. Отримані залежності щодо оцінки довжини факелу при спалюванні зрідженого газу використані у методиці проектування промислового газопальникового обладнання для широкого кола ВО на основі СНТ.

Список літератури

1. Иссерлин А. С. *Основы сжигания газового топлива*. Ленинград: Недра, 1987. 336 с.
2. Иванов Ю. В. *Газогорелочные устройства*. Москва: Недра, 1972. 276 с.
3. Кривоногов Б. М. *Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды*. Ленинград: Недра, 1986. 280 с.
4. Абдулин М. З. *Струйно-нишевая система стабилизации и сжигания топлива* : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.04.01 / Абдулин Михаил Загреддинович; КПИ. Киев, 1986. 18 с.
5. Абдулин М. З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХПІ», 2005. № 6. С. 130–144. ISSN 2078-774X.
6. Абдулин М. З., Овсиенко И. П., Дворцин Г. Р., Жученко А. М., Кулешов Ю. А. Оптимизация топочного процесса – путь к повышению эффективности, экологической безопасности и надежности работы котлов. *Новости теплоснабжения*. 2008. № 4. С. 31–35.
7. Абдулин М. З., Дворцин Г. Р., Тепляков И. Б., Строкин В. Н. Горелочное устройство на основе саморегулирующей системы смесеобразования и стабилизации пламени. *Труды IV международной научно-технической конференции «Комплексная автоматизация промышленности»*. 1990. С. 12–16.
8. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нишевої системи на робочий процес паликових пристроїв : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. тех. наук: 05.14.14 /

Сірий Олександр Анатолійович; НТУУ «КПІ». Київ, 2016. 28 с.

9. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. *Физические величины* : справочник. Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
10. Линевер Ф. Измерение температур в технике : справочник. Москва: Металлургия, 1980. 543 с.

References (transliterated)

1. Isserlin A. S. (1987), *Osnovy szhiganiya gazovogo topliva* [Foundation of gas fuel combustion], Nedra, Moscow, Russian.
2. Ivanov Yu. V. (1972), *Gazogorelochnye ustroystva* [Gas burning devices], Nedra, Moscow, Russian.
3. Krivonogov B. M. (1986), *Povyshenie effektivnosti szhiganiya gaza i ohrana okruzhayushchej sredy* [Improving the efficiency of gas combustion and protecting the environment], Nedra, Leningrad, Russian.
4. Abdulin M. Z. (1986), *Strujno-nishevaya sistema stabilizacii i szhiganiya topliva* : avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.04.01 [The jet-niche system of stabilization and burning of fuel: PhD thesis], KPI, Kiev.
5. Abdulin M. Z. (2005), "Primenenie strujno-nishevoj tekhnologii szhiganiya topliva v energeticheskikh ustanovkakh [Application of jet-niche technology of fuel combustion in power plants]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 6, pp. 130–144, ISSN 2078-774X.
6. Abdulin M. Z., Ovsienko I. P., Dvorcin G. R., Zhuchenko A. M. and Kuleshov Yu. A. (2008), "Optimizaciya topochnogo processa – put' k povysheniyu effektivnosti, ekologicheskoy bezopasnosti i nadezhnosti raboty kotlov [Optimization of the combustion process - a way to improve the efficiency, environmental safety and reliability of boiler operation]", *Novosti teplosnabzheniya*, No. 4, pp. 31–35.
7. Abdulin M. Z., Dvorcin G. R., Teplyakov I. B. and Strokin V. N. (1990), "Gorelochnoe ustroystvo na osnove samoreguliruyushchejsya sistemy smeseobrazovaniya i stabilizacii plameni [Burner device based on a self-regulating system of mixture formation and flame stabilization]", *Trudy IV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Kompleksnaya avtomatizaciya promyshlennosti»* [Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference "Integrated Automation of Industry"], pp. 12–16.
8. Sirij O. A. (2016), *Vpliv parametriv strumenevo-nishevoj sistemi na robuchij proces pal'nikovih pristrojiv* : avtoref. dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. tekhn. nauk: 05.14.14 [Influence of the characteristics of the jet-niche system workflow burners: PhD thesis], NTUU "KPI". Kyiv.
9. Babichev A. P., Babushkina N. A. and Bratkovsij A. M. (1991), *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* [Handbook of physical magnitudes], Pod red. Grigor'eva, I. S. and Mejliхова, E. Z., Energoatomizdat, Moscow.
10. Linever F. (1980), *Izmerenie temperatur v tekhnike: Spravochnik* [Handbook of temperature measurement in the technique], Metallurgiya, Moscow.

Надійшла (received) 08.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сірий Олександр Анатолійович (Серый Александр Анатольевич, Siryi Alexander) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», старший викладач кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій; м. Київ-56, вул. Політехнічна, 6, корпус №5, Україна; e-mail: Seruy_Alex@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5811-9037>.

Абдулін Михайло Загреддинович (Абдулин Михаил Загреддинович, Michail Abdulin) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій; м. Київ-56, вул. Політехнічна, 6, корпус №5, Україна; e-mail: MZAbdulin@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9900-7314>.